

На правах рукописи

Гурская Альбина Валентиновна

СВОЙСТВА БОЗОНОВ ХИГГСА  
В НЕМИНИМАЛЬНОЙ СУПЕРСИММЕТРИЧНОЙ  
СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ С НАРУШЕНИЕМ  
*CP*-ИНВАРИАНТНОСТИ

01.04.02 - теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Самара – 2017

Работа выполнена на кафедре общей и теоретической физики Самарского университета

Научные руководители: Бирюков Александр Александрович, кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ОТФ Самарского университета

Долгополов Михаил Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра ОТФ Самарского университета

Официальные оппоненты: Арефьева Ирина Ярославна, доктор физико-математических наук, профессор, Математический институт им. В. А. Стеклова РАН, ведущий научный сотрудник

Гладышев Алексей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Объединенный институт ядерных исследований, ЛТФ им. Н. Н. Боголюбова, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына.

Защита состоится " " 2017 г. в " " часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 при Объединенном институте ядерных исследований по адресу: 141980, г. Дубна Московской области, ЛТФ ОИЯИ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан " " 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 720.001.01, д.ф.-м.н.

Арбузов А.Б.

## Общая характеристика и актуальность работы

Актуальность темы. Стандартная модель (СМ), сформулированная во второй половине XX-го века, успешно описывает, в соответствии с экспериментами, широкий класс явлений и процессов физики элементарных частиц. В 2012 году на семинаре в ЦЕРН было объявлено об открытии новой частицы, которая по своим физическим свойствам хорошо подходит на роль бозона Хиггса СМ. Открытие бозона Хиггса доказало справедливость генерации масс фундаментальных частиц в СМ, которая включает в себя процедуру спонтанного нарушения калибровочной симметрии.

Однако СМ имеет ограничения в описании ряда физических процессов, которые указывают на то, что данная теория не может быть окончательной.

За счет взаимодействия с ненулевым вакуумным средним поля Хиггса частицы СМ приобретают массу. Однако нейтрино приобретают массу в теории искусственно. Это противоречит результатам экспериментов, которые регистрируют осцилляции нейтрино, что возможно лишь при наличии у нейтрино масс.

Регистрируемая масса бозона Хиггса СМ порядка 125 ГэВ говорит о том, что наша Вселенная находится в метастабильном состоянии и может распасться через определенное время. Представляется естественным попытаться найти область стабильности, модернизировав СМ.

В нашей Вселенной практически отсутствует антиматерия. Данное явление барионной асимметрии связывают с нарушением  $CP$ -инвариантности. В СМ вводится матрица смешивания кварков, которая содержит одну  $CP$ -нарушающую фазу. Но для получения наблюдаемого значения барионной асимметрии этого источника недостаточно. Можно отметить также, что результаты распадов  $D$ -мезонов независимо указывают на наличие дополни-

тельного источника  $CP$ -нарушения.

Одним из привлекательных объяснений барионной асимметрии считается электрослабый бариогенезис, требующий выполнения условий Сахарова, наличие сильного электрослабого фазового перехода первого рода, который, в свою очередь, напрямую зависит от массы бозона Хиггса. Найденный на LHC бозон Хиггса с массой 125 ГэВ не удовлетворяет условиям сильного электрослабого фазового перехода первого рода в СМ. Более подходящее значение массы должно быть  $< 50$  ГэВ.

Имеются и другие нерешаемые в СМ вопросы, что указывает на необходимость ее дальнейшего развития.

Попытки решить указанные проблемы приводят к расширению СМ, прежде всего, скалярного сектора Хиггса.

В последние годы привлекательной являлась идея суперсимметрии, согласно которой бозонные и фермионные поля связаны определенными преобразованиями. Такая ситуация в СМ не может реализовываться из-за несоответствия степеней свободы бозонов и фермионов, но такую модель можно построить, сопоставив каждой частице СМ в соответствие суперчастицу. В суперсимметричных моделях сектор Хиггса расширен естественным образом, как минимум до двух дублетов, исходя из требований киральности суперполей лагранжиана.

Исторически первым суперсимметричным расширением была МССМ (минимальная суперсимметричная стандартная модель), включающая минимально возможный набор полей при учете суперсимметрии: поля СМ и их суперпартнеры (при этом сектор Хиггса двухдублетный). Однако в ней возникает, так называемая,  $\mu$ -проблема, которая нашла успешное решение в следующей – неминимальной модели (НМССМ). В НМССМ сектор Хиггса расширен еще на один синглет скалярных полей, что обогащает картину  $CP$ -нарушения.

На сегодняшний день продолжается обработка результатов

экспериментов на LHC и поиски, так называемой новой физики, но трудность заключается в том, что пока выходов за рамки SM практически не наблюдается, а имеющиеся отклонения не достигли нужной статистической значимости.

Основными распадами для обнаружения бозона Хиггса на эксперименте являются:  $h \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $h \rightarrow ZZ$  и  $h \rightarrow WW$  с последующим распадом на четыре лептона, а также  $h \rightarrow \tau\tau$ . Некоторые процессы являются принципиально петлевыми, включая виртуальные частицы. Те же, которые могут реализовываться на древесном уровне, имеет смысл сопоставлять в сравнении с первыми на одном порядке теории возмущения. Поэтому мы приходим к необходимости учета петлевых поправок в теоретических расчетах.

Особенность расчета в однопелевом приближении связана с наличием дополнительных вкладов от суперсимметричных частиц. Также значимым является определение интенсивностей взаимодействия бозона Хиггса с распадающимися частицами, потому что  $CP$ -нарушающая фаза возникает в константе взаимодействия. Здесь естественным является осуществление нарушения  $CP$ -инвариантности при смешивании  $CP$ -четных и  $CP$ -нечетных состояний. Из этого следует, что нарушение  $CP$ -симметрии необходимо производить в два этапа, первым из которых является переход из нефизического базиса к  $CP$ -четным и  $CP$ -нечетным состояниям бозонов Хиггса. При таком подходе возникает проблема вычисления масс нейтральных бозонов Хиггса, так как в этом случае массовая матрица имеет размерность  $5 \times 5$ .

Однопетлевые поправки к массам бозона Хиггса могут быть существенными, решение проблемы с отрицательными квадратами масс возможно при учете петлевых поправок к массам. Другой подход заключается в расчете однопетлевых поправок к параметрам потенциала Хиггса. Эта необходимость также эффективно проявляется при переходе от масштаба суперсимметрии  $M_{SUSY}$

к рассматриваемой нами энергии на масштабе СМ. При рассмотрении  $CP$ -нарушения, мы также имеем возможность нарушить данную симметрию непосредственно в потенциале Хиггса в определенных параметрах, которые оказываются нулевыми на масштабе масс суперчастиц. При учете поправок к этим параметрам мы получаем также явное  $CP$ -нарушение в потенциале Хиггса, а также можем изучить, как это влияет на расчет масс нейтральных бозонов Хиггса. Следовательно, расчет поправок к  $CP$ -нарушающим параметрам потенциала Хиггса является необходимым.

Таким образом, формируется обоснование того, что явное  $CP$ -нарушение в потенциале Хиггса, а также нарушение  $CP$ -симметрии при смешивании  $CP$ -четных и  $CP$ -нечетных состояний должно быть совмещено. Дополнить полную картину  $CP$ -нарушения можно фазами спонтанного нарушения в вакуумных средних нейтральных компонент комплексных дублетов полей Хиггса. Таким образом, мы приходим к возможности рассмотрения общего случая нарушения  $CP$ -инвариантности.

Целью диссертации являются теоретические исследования спектра физических состояний бозонов Хиггса в зависимости от свободных параметров НМССМ при учете явного и спонтанного нарушений  $CP$ -инвариантности, а также при смешивании  $CP$ -четных и  $CP$ -нечетных состояний данных частиц.

Основные задачи:

1. Определить сектор Хиггса с включением явного и спонтанного нарушений  $CP$ -инвариантности, а также смешивания  $CP$ -четных и  $CP$ -нечетных состояний бозонов Хиггса. Вычислить в данной модели базис массовых состояний бозонов Хиггса с условиями существования минимума потенциала.

2. Рассчитать однопетлевые поправки к  $CP$ -нарушающим параметрам в эффективном потенциале Хиггса НМССМ.

3. Вывести аналитические выражения для комплексных кон-

стант взаимодействия нейтральных бозонов Хиггса с частицами модели.

4. Рассчитать массы трех нейтральных бозонов Хиггса и ширины их распадов  $h_i \rightarrow \gamma\gamma$ . Определить области возможных значений свободных параметров при учете поправок.

5. Рассчитать ширины распадов  $h \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $h \rightarrow ZZ/WW$  нейтральных бозонов Хиггса в НМССМ в однопетлевом приближении при наборе параметров, удовлетворяющих случаю легчайшего бозона, проявляющегося в СМ с массой 125 ГэВ.

6. Рассчитать ширины распадов  $h \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $h \rightarrow ZZ/WW$ ,  $h \rightarrow \chi^0\chi^0$  нейтральных бозонов Хиггса в НМССМ в однопетлевом приближении при наборе параметров, удовлетворяющих условиям электрослабого бариогенезиса.

Методы исследования:

Используются традиционные матричные методы линейной алгебры, метод эффективного потенциала. При расчете фейнмановских диаграмм основным является метод квантово-полевой теории возмущений. Результаты расчета петлевых вкладов представляются в виде линейных комбинаций скалярных редуцированных интегралов Велтмана–Пассарино.

Научная новизна диссертации:

1. В НМССМ предложен новый потенциал сектора Хиггса с включением явного и спонтанного нарушений  $CP$ -инвариантности, а также смешивания  $CP$ -четных и  $CP$ -нечетных состояний данных частиц. Для массовых параметров  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_3$  данной модели получены новые условия локального минимума потенциала Хиггса в зависимости от свободных параметров модели и фаз нарушения  $CP$ -инвариантности. Определен базис массовых состояний бозонов Хиггса из условий минимума потенциала в данной модели. Получены аналитические выражения для компонент массовой матрицы нейтральных бозонов Хиггса.

2. Впервые рассчитаны однопетлевые поправки к  $CP$ -наруша-

ющим параметрам в потенциале Хиггса НМССМ, которые приводят к явному нарушению  $CP$ -инвариантности. Получены аналитические результаты для них.

3. Получены новые аналитические выражения для комплексных констант взаимодействия бозонов Хиггса с частицами модели в зависимости от свободных параметров модели и фаз нарушения  $CP$ -инвариантности.

4. Проанализированы новые области возможных значений свободных параметров модели с учетом и без учета поправок к параметрам потенциала Хиггса. Расчитаны массы трех легчайших бозонов Хиггса и ширины распада  $h \rightarrow \gamma\gamma$  в однопетлевом приближении для нескольких наборов фиксированных параметров модели.

5. В предложенной модели рассчитаны массы нейтральных бозонов Хиггса и в однопетлевом приближении ширины распадов  $h \rightarrow \gamma\gamma, h \rightarrow ZZ/WW$  при наборе параметров, удовлетворяющих случаю легчайшего бозона Хиггса с массой 125 ГэВ.

6. При наборе параметров данной модели, удовлетворяющих условиям электрослабого бариогенезиса, рассчитаны массы нейтральных бозонов Хиггса и ширины их распадов  $h \rightarrow \gamma\gamma, h \rightarrow ZZ/WW, h \rightarrow \chi^0\chi^0$  в однопетлевом приближении.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сформулированная модель НМССМ с нарушением  $CP$ -инвариантности в общем виде с включением явного и спонтанного нарушений  $CP$ -инвариантности, а также смешивании  $CP$ -четных и  $CP$ -нечетных состояний бозонов Хиггса.

2. Аналитические выражения, полученные в данной модели, для массовых параметров  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ , компонент массовой матрицы нейтральных бозонов Хиггса, поправок к  $CP$ -нарушающим параметрам в потенциале Хиггса и комплексных констант взаимодействия бозонов Хиггса с частицами модели в зависимости от свободных параметров и фаз нарушения  $CP$ -инвариантности.



3. Спектр масс и ширин распадов  $h \rightarrow \gamma\gamma$  в однопетлевом приближении для нескольких наборов фиксированных параметров модели без учета поправок.

4. Массы нейтральных бозонов Хиггса и в однопетлевом приближении ширины распадов  $h \rightarrow \gamma\gamma, h \rightarrow ZZ/WW$  в сценарии при наборе параметров, удовлетворяющих условию, когда масса легчайшего бозона Хиггса имеет значение 125 ГэВ.

5. Массы нейтральных бозонов Хиггса и ширины их распадов  $h \rightarrow \gamma\gamma, h \rightarrow ZZ/WW, h \rightarrow \chi^0\chi^0$  в однопетлевом приближении в сценарии при наборе параметров, удовлетворяющих условиям электрослабого бариогенезиса.

#### Практическая значимость работы.

Возможность использования полученных результатов для планирования будущих экспериментов на ускорителях-коллайдерах частиц, а также для дальнейшего исследования свободных параметров модели и области их допустимых значений.

Достоверность обеспечивается строгостью используемых автором общепринятых методов квантовой теории поля, органически сочетающих в себе как традиционные теоретико-полевые методы, так и новейшие алгоритмы символьных и численных компьютерных расчетов.

Апробация работы. Основные результаты настоящей работы докладывались и обсуждались автором на следующих научных семинарах и конференциях: международный семинар по физике высоких энергий QUARKS (г.Пушкин, 2016 г.); международная сессия-конференция СЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" (г.Москва, 2012 г., 2014 г.); XXI и XXII международные семинары по физике высоких энергий и квантовой теории поля QFTNER (г.Санкт-Петербург, 2013 г.; г.Самара, 2015 г.); Математическая физика и ее приложения (г.Самара, 2012 г., 2014 г.); Ульяновская международная школа-семинар UISS-2016 (г. Ульяновск); научно-практическая конференция студентов-физиков и

молодых ученых (г.Ижевск, 2014г.; г.Омск, 2015 г., г.Ростов-на-Дону, 2016 г.); XVII международная научно-практической конференция "Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты"(г. Новосибирск, 2015 г.) XXXV международная научно-практическая конференция "Наука и современность - 2015"(НС-35, г.Новосибирск, 2015 г.), научные семинары кафедры общей и теоретической физики (г.Самара, СамГУ, 2012-2014 г.; "Самарского университета" , 2015-2017 г.).

Исследования были поддержаны грантами 12-02-31795 мол\_а Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и 14.В37.21.1299 ФЦП Министерства образования и науки Российской Федерации.

Личный вклад соискателя в решение рассматриваемых в диссертации задач является определяющим. Аналитические результаты и численные расчеты получены автором.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 работах, 3 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК [1-3], 3 работы [4-6] опубликованы в трудах международных конференций, из них 2 работы [4-5] в журналах, индексируемых в базе данных WoS.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной модели, которая связана с накопившимися трудностями внутри стандартной модели (СМ), которые, в частности, указывают на несовершенство скалярного сектора Хиггса. Обсуждаются возможные пути решения данных проблем в рамках суперсимметричных теорий, формулируются цели работы и дается краткая характеристика ее содержания.

В первой главе представлен обзор НМССМ, полевой состав данной модели. Особое внимание уделяется сектору Хиггса. Раскрывается проблема нарушения  $CP$ -инвариантности в секторе

Хиггса, его видах и способах введения в структуру лагранжиана. Потенциал Хиггса предлагается записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
U(\Phi_1, \Phi_2, S) = & -\mu_1^2(\Phi_1^\dagger\Phi_1) - \mu_2^2(\Phi_2^\dagger\Phi_2) - \mu_3^2(S^\dagger S) + \\
& + \frac{\lambda_1}{2}(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^2 + \frac{\lambda_2}{2}(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^2 + \lambda_3(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \lambda_4(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_1) + \\
& + \frac{\lambda_5}{2}(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \frac{\lambda_5^*}{2}(\Phi_2^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_1) + \\
& + \lambda_6(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_1^\dagger\Phi_1) + \lambda_6^*(\Phi_2^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_1) + \lambda_7(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \lambda_7^*(\Phi_2^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \\
& + k_1(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(S^\dagger S) + k_2(\Phi_2^\dagger\Phi_2)(S^\dagger S) + k_3(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(S^\dagger S^\dagger) + k_3(\Phi_2^\dagger\Phi_1)(SS) + \\
& + k_4(S^\dagger S)^2 + k_5(\Phi_1^\dagger\Phi_2)S + k_5(\Phi_2^\dagger\Phi_1)S^\dagger + k_6S^3 + k_6(S^\dagger)^3
\end{aligned}$$

Параметры  $\lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \kappa_3, \kappa_5, \kappa_6$  могут быть комплексными, но на масштабе супесимметрии  $\lambda_5 = \lambda_6 = \lambda_7 = 0$ , и нет никакого явного  $CP$ -нарушения вообще в этом случае. Следовательно, поправки к последним параметрам важнее для условий  $CP$ -нарушения. Также представляется необходимым объяснить значения параметров отличные от нуля на масштабе энергий СМ.

Также в работе рассматривается случай смешивания  $CP$ -четных и  $CP$ -нечетных состояний, и о его важности при рассмотрении влияния  $CP$ -нарушающих фаз на распады, т.к. при таком подходе мы получаем комплексные константы взаимодействия с бозонами Хиггса. Также в данной главе говорится о проблеме вычисления массы нейтральных бозонов Хиггса при диагонализации массовой матрицы размерностью  $5 \times 5$ .

Кроме того, выводятся аналитические выражения для констант взаимодействия нейтральных бозонов Хиггса с частицами модели. Выводятся аналитические выражения для параметров  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ , полученные из условия локального минимума потенциала Хиггса. Получены новые аналитические выражения для компонент массовой матрицы нейтральных бозонов Хиггса.

Проведен расчет поправок к  $CP$ -нарушающим параметрам потенциала Хиггса, которые вводят дополнительное явное  $CP$ -

нарушения непосредственно в потенциал Хиггса, а также решает проблему отрицательных масс после процедуры перехода к физическому базису. Приведены аналитические выражения для поправок. Их значения объясняются эффективными вкладами из сектора скварков третьего поколения. В зависимости от количества внешних линий и типа внутренней петли, мы будем иметь дело с тремя типами интегралов. А аналитические выражения для поправок к параметрам потенциала Хиггса имеют вид:

Во второй главе обсуждаются результаты экспериментов на БАК и имеющиеся отклонения от СМ, наблюдаемые распады бозона Хиггса на сегодняшний день. Также, делается обзор допустимых распадов в НМССМ в рамках теории. Выявляются оптимальные процессы для дальнейшего исследования:  $h \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $h \rightarrow ZZ/WW$ .

Также рассмотрен формализм однопетлевых вычислений, аналитические выражения для петлевых вкладов в элементарные процессы распада бозона Хиггса.

Мы выбираем в качестве лидирующих вкладов кварки и их суперпартнеры, таким образом, мы имеем дело только в двумя типами петли: векторной и скалярной.

В расчетах используется теорию возмущений совместно с фейнмановским диаграммным подходом. Такой подход основан на расчете всех петлевых поправок, необходимых для поддержания требуемой точности вычислений, без каких-либо приближений в расчете скалярных интегралов Фейнмана и построении схемы полной однопетлевой перенормировки, однозначно конкретизируемой вводимыми параметрами и соотношениями, связывающими параметры перенормировки и физические величины. Как показывает опыт использования данного подхода, последний является наиболее точным инструментом вычисления физических наблюдаемых, являясь формально масштабно независимым и инвариантным относительно выбора калибровки. В рамках фейнма-

новского диаграммного подхода учитываются эффекты ненулевых значений импульсов внешних частиц, играющие существенную роль на высоких масштабах энергии.

Для построение необходимых диаграмм используется пакет FeynArts, которое является дополнительным приложением программы символьной математики Wolfram Mathematica. Сам же процесс построения основан на правила Фейнмана для НМССМ с  $CP$ -нарушением. Это значит, что программа задействована лишь для визуализации диаграмм, а аналитические выражения выводятся независимо из лагранжиана теории. Процедура записи аналитических выражений проводится в пакете FeynCalc.

Таким образом, расчет ширины распада бозонов Хиггса сводится в расчету амплитуды распада, основной составляющей которой является петлевой вклад.

Приведены аналитические выражения для петлевых вкладов кварков и скварков как линейные комбинации скалярных функций Пассарино–Велтмана  $A_0, B_0, C_0$ .

Третья глава посвящена анализу численных результатов.

Сначала рассмотрен случай расчета масс нейтральных бозонов Хиггса без учета поправок в потенциале Хиггса, и на основе этого выстроены сценарии, которые возможны во избежания отрицательных квадратов масс в массовой матрице. Для соответствующих сценариев посчитаны ширины распадов на два фотона.

Выбраны два возможных сценария реализации нескольких бозонов Хиггса в физике элементарных частиц. Стандартный сценарий бозона Хиггса с наименьшей возможной массой 125 ГэВ не допускает существования других частиц меньшей массы и отвечает результатам наблюдений на БАК. Вторым сценарием основан на ограничениях электрослабого бариогенезиса и требовании к массе легчайшего бозона Хиггса, соответствующего условиям сильного фазового перехода первого рода. Приведены обоснования ненаблюдаемости легкого бозона Хиггса на ускорительном

эксперименте за счет возможного распада легчайшей частицы на нейтралино - кандидат на роль частицы темной материи, т.е. недетектируемую частицу.

В заключении диссертации приведена общая характеристика работы и сделаны основные выводы по полученным результатам.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. В работе развита модель НМССМ с включением в сектор Хиггса явного и спонтанного нарушений  $CP$ -инвариантности, а также смешивания  $CP$ -четных и  $CP$ -нечетных состояний бозонов Хиггса. Данная модель позволяет рассматривать пять физических нейтральных состояний бозонов Хиггса без определенной  $CP$ -четности и способна описывать результаты экспериментов на БАК.

2. Из наложения требований минимума потенциала Хиггса выведены аналитические выражения, определяющие массовые параметры  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  данной модели в зависимости от других свободных параметров и фаз нарушения  $CP$ -инвариантности. Эти выражения определяют массовые параметры, и, таким образом, число свободных параметров сокращается. Далее получены аналитические выражения для компонент массовой матрицы нейтральных бозонов Хиггса с учетом выражений для массовых параметров.

3. Получены аналитические выражения для поправок по теории возмущений к  $CP$ -нарушающим параметрам в эффективном потенциале Хиггса данной модели. Учет поправок для параметров  $\lambda_i$  важен, так как вносит дополнительное явное нарушение  $CP$ -инвариантности в потенциал Хиггса. Кроме того, полученные выражения объясняют ненулевые значения параметров  $\lambda_i$  при энергиях ниже масштаба суперсимметрии.

4. Получены аналитические выражения для комплексных констант взаимодействия бозонов Хиггса с частицами модели в зави-

симости от свободных параметров и фаз нарушения  $CP$ -инвариантности. Особенность этих выражений заключается в наличии компонент матрицы дополнительного смешивания  $CP$ -четных и  $CP$ -нечетных состояний бозонов Хиггса.

5. Получен спектр масс и ширины основных распадов бозонов Хиггса для нескольких наборов фиксированных параметров модели. Проведен анализ допустимых значений параметров для выхода на реалистичные значения масс при учете поправок к  $CP$ -нарушающим параметрам потенциала Хиггса.

6. В рамках предложенной модели возможно делать. Определены два возможных сценария проявления нескольких бозонов Хиггса. Первому соответствует набор параметров, приводящий к легчайшему бозону Хиггса массой 125 ГэВ, что соответствует наблюдаемой частице на эксперименте. Второй сценарий реализуется при электрослабом бариогенезисе, с ограничением на массу бозона Хиггса менее 50 ГэВ. Наблюдаемому бозону Хиггса соответствует второе по массе физическое состояние.

#### Основные публикации по теме диссертации

1. Гурская А.В., Долгополов М.В. Сценарии исследования бозона Хиггса в НМССМ // Вестник Самарского государственного университета. 2014. № 7 (118). С. 125-133.

2. Гурская А.В. Сектор Хиггса НМССМ с нарушением  $CP$ -инвариантности // Изв.вузов. Физика. 2015. Т.58. №7/2. С.78-82.

3. А. В. Гурская, "Ширина распада бозона Хиггса на два фотона в однопетлевом приближении с учетом  $CP$ -нарушения в НМССМ Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, Т. 19, № 4. (2015), 650-657. doi: 10.14498/vsgtu1391

4. Dolgoplov M.V., Gurskaya A.V., Rykova E. N. Finite-temperature Higgs potentials // EPJ Web of Conferences 125, 02006 (2016)

5. Gurskaya A.V., Dolgoplov M.V. The Higgs bosons decays in the NMSSM with  $CP$ -violation // EPJ Web of Conferences 125,

02011 (2016)

6. Gurskaya A. Higgs bosons in NMSSM with CP-violation / Proceedings of the XXII International Workshop QFTHEP'2015 – MSU, SINP.

7. Гурская А.В. CP-нарушение в расширенном секторе Хиггса // Аспирант. 2014. №4. С. 75-79.

8. Гурская А.В. Роль бозона Хиггса в барионной асимметрии Вселенной // Аспирант. 2015. №1. С. 180-182.

9. Гурская А.В., Филиппов Ю.П. Определение интервалов возможных значений масс нейтралино в моделях МССМ и НМС-СМ в низшем приближении // Теоретическая физика. 2011. Т. 12. С. 69-81.

10. Гурская А.В. Современные инструменты исследования физики бозона Хиггса / Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции // Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2015. стр. 109-112.

11. Гурская. А.В. Перспективы суперсимметричных моделей / Наука и современность - 2015: сборник материалов XXXV Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2015. стр. 134-138.

Подписано в печать

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ N  
443011, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.